



Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

ETUDE EXPERIMENTALE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR EN MATERIAU A
CHANGEMENT DE PHASE (MCP).

Présenté par :

❖ MOKHTARI Abdelhamid

❖ BOUHENNI Fayçal

Soutenu le 12/07/2022 devant le jury composé de :

Président	Dr. FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Mr. SAIDANI Djamel	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022

Sommaire

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iii
Nomenclature	vi
Résumé	01
Introduction générale	04

Chapitre 01

1. Étude bibliographique	06
--------------------------	----

Chapitre 02

2.1 Stockage thermique	09
2.1.1. Stockage sensible	09
2.1.2. Stockage latent	10
2.1.3. Stockage thermochimique	12
2.2. Le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)	13
2.2.1. Matériaux à Changement de Phase (MCP)	13
2.2.2. Types de MCP	13
2.2.3 Paraffines	14

Chapitre 03

3. Procédure expérimentale	16
3.1 Matériel et accessoire de l'installation	16
3.2 Matériau de tuyauterie	17
3.3 Le choix de MCP	18
3.4 Remplissage de MCP (paraffine)	19
3.5 Placement des capteurs	19
3.6 Premier cas	20
3.7 Deuxième et troisième cas	20

Sommaire

Chapitre 04

4. Introduction	23
4.1 Méthodologie	23
4.2 Objectifs	24
4.3 Les hypothèses du travail	25
4.4 Résultats et discussions	25
4.4.1. 1ère partie : Configuration horizontale	25
4.4.2. 2ème partie : Configuration verticale en bas	31
4.4.3. Troisième partie : Configuration verticale en haut	39

Conclusion générale

Conclusion générale	47
Référence bibliographies	48

Remerciement

Nous remercions le bon Dieu pour le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant nos années d'études.

*Nous tenons à remercier notre encadreur le **Dr. MEDJAHED Bendida** pour ces conseils et son suivi continu durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury **Dr. FLITTI Abdelmadjid** et le membre de jury **Mr. SAIDANI Djamel** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

*Ce travail est dédié à toute ma famille ;
Surtout à mon père, ma mère, mes frères.
Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui sont proches de moi.*

MOKHTARI Abdelhamid

BOUHENNI Fayçal

La Liste des figures

La Liste des figures :

Figure	Description	Page
Chapitre 02 :		
Figure 2.1	Graphes de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible	11
Figure 2.2	Classification des MCP proposée par Abhat	13
Chapitre 03 :		
Figure 3.1	Plant d'essai ; 1) coté gauche, 2) coté droit.	16
Figure 3.2	Matériel et accessoire de l'installation ; a) pompe à eau, b) capteur de température, c) Débitmètre, d) Résistance Thermique, e) manomètre de température.	17
Figure 3.3	Soudage des tubes en cuivre.	18
Figure 3.4	paraffine utilisé.	18
Figure 3.5	Remplissage de MCP.	19
Figure 3.6	Placement des capteurs.	19
Figure 3.7	Cas horizontal.	20
Figure 3.8	Deuxième cas essais vertical entré en bas.	20
Figure 3.9	troisième essais verticale entré en haut.	21
Chapitre 04 :		
Figure 4.1	Configurations d'injection possibles durant les essais.	24
Figure 4.2	évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur horizontale à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	26
Figure 4.3	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge à l'horizontale à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$	28
Figure 4.4	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge à l'horizontale à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	28

La Liste des figures

Figure 4.5	évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur horizontale à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	29
Figure 4.6	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge à l'horizontale à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	30
Figure 4.7	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge à l'horizontale à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	30
Figure 4.8	évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en bas à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	32
Figure 4.9	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le bas à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	34
Figure 4.10	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le bas à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	35
Figure 4.11	évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en bas à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	36
Figure 4.12	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le bas à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	37
Figure 4.13	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le bas à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	38
Figure 4.14	évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en haut à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	40
Figure 4.15	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le haut à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	42
Figure 4.16	Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le haut à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 70 \text{ °C}$.	43
Figure 4.17	évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en haut à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_e \text{ eau} = 80 \text{ °C}$.	44

La Liste des figures

- Figure 4.18** Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge 45
par le haut à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e \text{ eau}} = 80 \text{ °C}$
- Figure 4.19** Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge 46
par le haut à $Q_v \text{ eau} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e \text{ eau}} = 80 \text{ °C}$.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE :

SYMBOLES	UNITES	DESIGNATION
D_e	mm	Diamètre extérieur
D_i	mm	Diamètre intérieur
T	°C	Température
T_s	°C	Température de sortie
T_e	°C	Température de entre
1.2.....9.10		Numérotation de capteur
Q_v	l/h	Débit volumique
S	m ²	Surface
ρ	Kg/m ³	Masse Volumique
Re		Nombre de Reynolds
L	m	Longueur
t	min	Temps
μ	Pa /S	Viscosité Dynamique Du fluide
	degré	Angle
C_p	J/kg K	Chaleur spécifique
λ	W/m °C	Conductivité Thermique du Matériau
E_{sensible}	J	stockage sensible
m	kg	masse
E_{latente}	J	stockage latente
T_{fusions}	°C	température de Fusion
Q	J	Quantité de chaleur
T_{initial}	°C	température initial
ΔT	°C	Déférence de Température
Δh	J/kg	d'enthalpie
ΔH_r	J/mol	chaleur de réaction
V	m/s	vitesse de l'eau
eau		L'eau
l		L'équidé
s		Solide
G		Gaz

Etude expérimentale d'un échangeur de chaleur en matériau à changement de phase (MCP).

Résumé :

Le travail exposé dans ce mémoire, porte sur l'étude expérimentale d'un échangeur de chaleur en matériau à changement de phase (MCP). Dans cette étude, trois configurations avec un seul d'échangeur de longueur un mètre sont testés. L'échangeur est un échangeur à tube en cuivre présentant une surface d'échange (côté fluide) de 0.044 m^2 , qu'on définira comme échangeur de référence. Un tube transparent en PMMA est placé autour de l'échangeur, dans lequel est contenue la paraffine. Pour l'échangeur à tubes lisse en cuivre, cinq thermocouples sont placés au milieu du MCP (paraffine), à la périphérie extérieure (au contact du tube de PMMA). Le but est de comprendre le comportement de tels échangeurs en régime transitoire au contact de MCP. Une étude expérimentale à basse température, un échangeur de type tube-calandre seront testés avec différentes orientations horizontale et verticale. Les injections d'eau dans la première section d'essai horizontale sont en (droites vers la gauche), la deuxième section d'essai vertical en (bas vers le haut) et le troisième (en haut vers Bas). Les trois études nous avons fait pour chacun la charge (chauffage) et décharge (refroidissement) de l'eau qui se situe dans le tube interne et les MCP dans le tube externe. L'analyse montre que les résultats pour les trois cas aient parfaits avec la réalité physique.

Mots clés : Stockage thermique, Matériaux à Changement de Phase (MCP), Échangeurs de chaleur, Température.

Experimental study of a phase change material (PCM) heat exchanger

Abstract:

The work presented in this dissertation concerns the experimental study of a phase change material (PCM) heat exchanger. In this study, three configurations with only one heat exchanger of one meter length are tested. The exchanger is a copper tube exchanger with an exchange surface (fluid side) of 0.044 m^2 , which will be defined as the reference exchanger. A transparent PMMA tube is placed around the exchanger, in which the paraffin is contained. For the smooth copper tube exchanger, five thermocouples are placed in the middle of the MCP (paraffin), at the outer periphery (in contact with the PMMA tube). The goal is to understand the behavior of such exchangers in transient state in contact with PCM. An experimental study at low temperature, a tube-shell type exchanger will be tested with different horizontal and vertical orientations. The water injections in the first horizontal test section is in (right to left), the second vertical test section in (bottom to top) and the third (top to bottom). The three studies we have done for each charge (heating) and discharge (cooling) of the water located in the inner tube and the PCMs in the outer tube. The analysis shows that the results for the three cases are perfect with the physical reality.

Keywords: Thermal storage, Phase Change Materials (PCM), Heat exchangers, Temperature.

دراسة تجريبية لمبادل حراري لمواد متغيرة الطور (PCM)

ملخص:

يتعلق العمل المقدم في هذه الرسالة بالدراسة التجريبية لمبادل حراري لمواد متغيرة الطور (PCM). في هذه الدراسة ، تم اختبار ثلاثة تكوينات بمبادل حراري واحد بطول متر واحد فقط. المبادل عبارة عن مبادل أنبوب نحاسي بسطح تبادل (جانبا مائعا) يبلغ 0.044 متر مربع ، والذي سيتم تعريفه على أنه المبادل المرجعي. يتم وضع أنبوب PMMA شفاف حول المبادل ، حيث يتم احتواء البارافين. بالنسبة لمبادل الأنبوب النحاسي الأملس ، يتم وضع خمس مزدوجات حرارية في منتصف MCP (البارافين) ، في المحيط الخارجي (عند ملامسة أنبوب PMMA). الهدف هو فهم سلوك مثل هذه المبادلات في حالة عابرة في اتصال مع PCM. دراسة تجريبية في درجة حرارة منخفضة، سيتم اختبار مبادل من النوع الأنبوبي مع اتجاهات أفقية ورأسية مختلفة. يتم حقن الماء في قسم الاختبار الأفقي الأول (من اليمين إلى اليسار)، وقسم الاختبار العمودي الثاني (من الأسفل إلى الأعلى) والثالث (من الأعلى إلى الأسفل). الدراسات الثلاث التي أجريناها لكل شحنة (تسخين) وتبريد) للمياه الموجودة في الأنبوب الداخلي وأجهزة PCM في الأنبوب الخارجي. يظهر التحليل أن نتائج الحالات الثلاث مثالية مع الواقع المادي.

الكلمات المفتاحية: التخزين الحراري ، مواد تغيير الطور (PCM) ، المبادلات الحرارية ، درجة الحرارة.

Introduction générale

Introduction générale

Dans le cadre de ce travail de recherche, une solution d'économie d'énergie pour l'utilisation des MCP dans le secteur industriel a pour objectif de réduire la consommation d'énergie. Elle consiste à augmenter la capacité de stockage thermique dans les échangeurs de chaleur dans le domaine industriel par intégration des MCP. Ces matériaux se distinguent par un échange de chaleur important, par changement de phase. En se basant sur la propriété de stockage de chaleur par voie latente, ces matériaux permettent une protection ou une isolation thermique de l'habitat vis-à-vis de l'influence extérieure. Dans notre étude nous ont pris deux cas différents d'échangeurs de chaleur, dans le premier cas nous avons fait l'étude d'un tube concentrique à double diamètre horizontal, et dans le deuxième cas le tube en vertical (entré en bas et en haut), Nous faisons le chauffage et le refroidissement de l'eau dans les échangeurs de chaleur. Pour le chauffage en a utilisé l'eau chaude a circuit fermé et pour le refroidissement l'eau froide a circuit ouvert, et en variant la température de l'eau et le débit.

Cette étude concerne la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et le développement d'un système de stockage pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle. L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) permet d'atteindre une densité énergétique élevée et de restituer la chaleur à température constante. Cependant, leur faible conductivité thermique impose d'améliorer les transferts thermiques, notamment par l'utilisation d'échangeurs à surface augmentée.

Le contexte et les résultats de cette étude sont présentés ici en détails. Le premier chapitre a été réservé à la présentation de l'étude bibliographique. Une généralité sur le stockage d'énergie et les matériaux à changement de phase (MCP) est présentée dans le deuxième chapitre. Une procédure expérimentale détaillée sur la réalisation d'un banc d'essai est présentée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été réservé sur la présentation des résultats expérimentale et les discussions. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

Chapitre 01

Étude bibliographie

1. Étude bibliographique

La demande énergétique nationale et mondiale ne cesse d'augmenter et elle continuera à augmenter dans les prochaines décennies. Face à ce constat, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution qui permet de satisfaire les besoins mondiaux croissants tout en respectant les contraintes environnementales. Cependant, l'inconvénient de ces énergies réside dans leur production intermittente et irrégulière. Dans ce cadre, le stockage de l'énergie suscite beaucoup d'intérêt puisqu'il permet de surmonter ces inconvénients. Les matériaux à changement de phase (MCP) solide-liquide sont une réponse possible à ce problème. Ils ont la capacité de stocker et de libérer l'énergie thermique lors du passage d'une phase à une autre. Pour cela nous cherchons à travailler sur l'amélioration des systèmes de stockage d'énergie thermique, par chaleur latente, afin d'implanter les résultats trouvés, par la suite, dans certaines applications industrielles.

De nombreux travaux sont consacrés au développement de nouveaux systèmes de stockage, dont ils varient selon la taille de la centrale. Cependant, tous ces systèmes doivent faire un compromis entre la qualité de la solution technologique adoptée et le coût de cette dernière. L'intérêt du stockage par chaleur latente en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) a été démontré de nombreuses fois en raison de sa très grande densité de stockage. Cependant, compte tenu de leur faible conductivité thermique, la puissance de stockage et de déstockage est limitée. Différentes méthodes pour améliorer le transfert thermique au sein des MCP existent, comme par exemple l'ajout de particules métalliques ou de graphite, l'imprégnation dans une matrice conductrice, ou encore l'amélioration de la géométrie de l'échangeur [1-2].

Un grand nombre de publications est tourné vers l'étude de l'implantation de MCP en cascade dans les stockages latents. Ainsi, T. Watanabe et al. [3] a utilisé trois MCP dans des capsules cylindriques pour un échangeur avec de l'air. Une augmentation de 10% du taux de chaleur échangée a été observée. A. Karaipekli et al. [4] a prouvé que la conductivité thermique d'un composite dépend linéairement du pourcentage massique de matériau conducteur inséré dans une étude où il compare la conductivité thermique du composite MCP-graphite avec celle des fibres de carbone mélangées à du MCP. En 2015, une installation expérimentale à taille pilote a vu le jour en Espagne [5] pour tester la solution d'association de MCP en cascade dans un échangeur type tube-calandre.

Dans le cadre du projet européen DISTOR, Pincemin et al. [6] ont utilisé du graphite pour améliorer la conductivité thermique de sels inorganiques. Les travaux de Mehling et al. [7] ont montré que la mise au point d'un composite formé de paraffine et de graphite expansé permet d'obtenir une conductivité thermique près de 100 fois supérieur à la conductivité de la paraffine seule. Medrano et al. [8] ont également mis en évidence les performances résultant de l'utilisation de matériaux composites (graphite/MCP) dans un échangeur thermique en les comparants à différents types d'échangeurs commerciaux.

Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables. En effet, Hadjieva et al. [9] a pu tester la robustesse de trois échantillons de paraffine pendant 900 cycles d'opération. A. Sharma et al. [10] affirme même que les propriétés des paraffines restent stables après 1500 cycles. Parmi les avantages des paraffines, on peut aussi citer la faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation. De plus, certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion. Enfin, elles sont produites en quantités importantes par l'industrie des procédés chimiques et sont donc facilement disponibles et peu coûteuses [11]. Une étude expérimentale faite par H. Michels et R. Pitz-Paal [12] a montré les bénéfices de MCP en cascade dans un échangeur tube-calandre. Trois MCP sont placés dans la calandre et de l'huile synthétique est utilisée en tant que fluide caloporteur. L'expérience a montré qu'une grande quantité de MCP a subi un changement de phase lors d'une charge et que la capacité de stockage d'une unité avec trois MCP est plus importante qu'une unité de stockage latent simple. Compte tenu de la disparité des résultats disponibles dans les différentes publications, il nous semblait important de mener à nouveau une étude expérimentale d'un échangeur de chaleur en matériau à changement de phase (MCP). Dans cette étude, le choix du MCP se porte sur des composés organiques de types paraffines, compte tenu de leur bonne stabilité chimique, surfusion quasi-inexistante, faible coût et d'un large choix de températures de fusion disponibles dans notre domaine d'application.

Chapitre 02

Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

2.1 Stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes:

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes (Exemple : Eau, Briques, Béton renforcé, Tuiles et céramiques, Sable – roche – huile minérale.....).
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase (Exemple : Acide maléique, Xylitol, NaNO_3 ,.....).
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption (Exemple : $\text{MgH}_2 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$,.....).

2.1.1. Stockage sensible

Le stockage sensible est le moyen le plus commun de réutiliser la chaleur [13]. Dans les enceintes de stockage sensible, la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce stockage, non isotherme accumule une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation (2.1) [12]:

$$E_{sensible} = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Dans ces types de stockage, le matériau de stockage se présente soit sous forme liquide, soit sous forme solide, soit les deux.

Dans les réservoirs de stockage solide, le matériau de stockage est conditionné sous forme de lit granulaire ou matriciel fixe et l'échange de chaleur est réalisé via un fluide caloporteur qui transfère sa chaleur via un échangeur de chaleur ou qui traverse directement le matériau de stockage poreux. Dans ce cas, le réservoir de stockage s'appelle un régénérateur. Lorsque le fluide caloporteur est un gaz, sa capacité calorifique étant très faible devant le matériau de stockage, sa contribution au stockage est négligeable. Lorsque le fluide caloporteur est un liquide, alors, sa contribution au stockage n'est pas négligeable et le système est appelé dual. Le solide le plus utilisé est le béton de par son faible coût, sa facilité d'usage et sa disponibilité, ses propriétés de résistance mécanique mais surtout sa capacité calorifique élevée [14]. D'autres matériaux peuvent être considérés comme les roches, le sable ou encore les matériaux réfractaires comme la silice ou l'alumine.

Dans les réservoirs de stockage liquide, il est possible de profiter de la stratification naturelle du matériau et de stocker du fluide chaud et du fluide froid dans un même réservoir. Ce type

de réservoir s'appelle thermocline et présente une couche chaude dans la partie supérieure et une couche froide dans la partie inférieure ainsi que d'une zone de gradient thermique entre les deux. C'est précisément cette zone que l'on nomme thermocline. Le gradient entre la couche chaude et la couche froide dépend des propriétés du matériau de stockage ainsi que des débits du fluide caloporteur circulant dans le système de stockage. Lorsque l'on utilise un régénérateur, c'est-à-dire lorsque le matériau de stockage est une matrice solide dans laquelle circule un fluide caloporteur, il est possible d'obtenir une stratification thermique plus grande sur une plus petite hauteur de réservoir grâce aux propriétés d'inertie thermique de la matrice solide et de réduire ainsi les volumes de stockage [15]. Il existe par ailleurs des systèmes de stockage thermique liquide où le chaud et le froid sont stockés dans deux réservoirs différents, si bien que les volumes de stockage sont multipliés par deux. C'est le cas dans certaines centrales solaires à concentration, comme Solar Two aux Etats-Unis [16]. Dans la catégorie des liquides, on trouve les sels fondus, les huiles minérales ou synthétiques ou plus communément l'eau, utilisée notamment dans les ballons d'eau chaude, stockage de chaleur sensible le plus répandu [15].

2.1.2. Stockage latent

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gaz ou encore lors de sa transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation (2.2) :

$$E_{latente} = m \Delta h_{S-L \text{ ou } L-G} \quad (2.2)$$

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température – énergie de la figure 2.1.

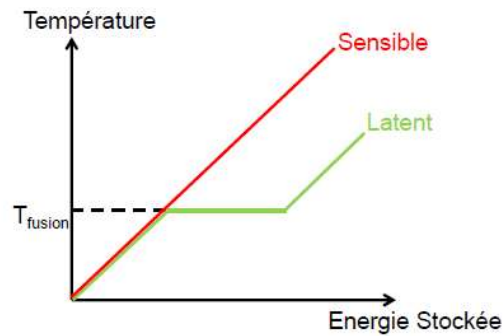


Figure 2.1 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [13]

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation (2.3) :

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} m C_{p,S} dT + m \Delta h_{S-L} + \int_{T_{fusion}}^{T_{final}} m C_{p,L} dT \quad (2.3)$$

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCP peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz.

La transition solide-solide a été envisagée pour remplacer l'encapsulation des MCP utilisée en batch dans certains containers de stockage. Cette transition est simple à gérer dans la mesure où il n'y a pas ou peu d'expansion volumique, ce qui limite les risques de fuites et de surpression. Cependant, peu de matériaux ont été identifiés, parfois car la chaleur latente de transition solide-solide est trop faible devant celle de la transition solide-liquide, ou parfois car le matériau n'est pas stable thermiquement.

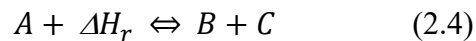
Les transformations liquide-gaz sont attractives car elles présentent la plus grande chaleur latente. Néanmoins, l'énorme changement de volume associé à l'évaporation du liquide rend

le stockage complexe et souvent inutilisable. C'est pourquoi cette transition est écartée des systèmes de stockage latent.

Bien que la chaleur latente de fusion soit plus faible que la chaleur latente d'évaporation, la transition solide-liquide est la plus prometteuse puisqu'elle permet de limiter l'expansion volumique et ainsi l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors d'une fusion, il faut compter une augmentation volumique d'environ 10 % [13]. Si un volume d'expansion est prévu dans le container, alors le solide comme le liquide peuvent être contenus dans le système de stockage limitant ainsi la pression subie par le réservoir.

2.1.3. Stockage thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout ou partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu.



Avec

A : Réactif solide ou liquide ;

ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol ;

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide.

Une condition pour que le stockage ait une taille suffisamment petite est que les réactifs soient plutôt solides ou liquides. Les produits obtenus peuvent être indépendamment des gaz, liquides ou solides. Lorsque la réaction se fait avec un gaz, le système de stockage peut se présenter sous la forme d'un réacteur à lit fluidisé. Par ailleurs, dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés pour être utilisés ultérieurement et ce système est propice au stockage inter-saisonnier.

2.2. Le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

2.2.1. Matériaux à Changement de Phase (MCP)

On nomme matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Cette plage est grossièrement localisée entre 10 et 80 degrés. Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans notre vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire...).

2.2.2. Types de MCP

On peut classer les MCP selon trois catégories :

- Les composés organiques: paraffines, corps non-paraffiniques.
- Les composés inorganiques: hydrates de sels, sels et métaux.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les différents sous-groupes de MCP présentent des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception du système de stockage thermique pour une application donnée.

En 1983, Abhat [17] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la figure 2.2.

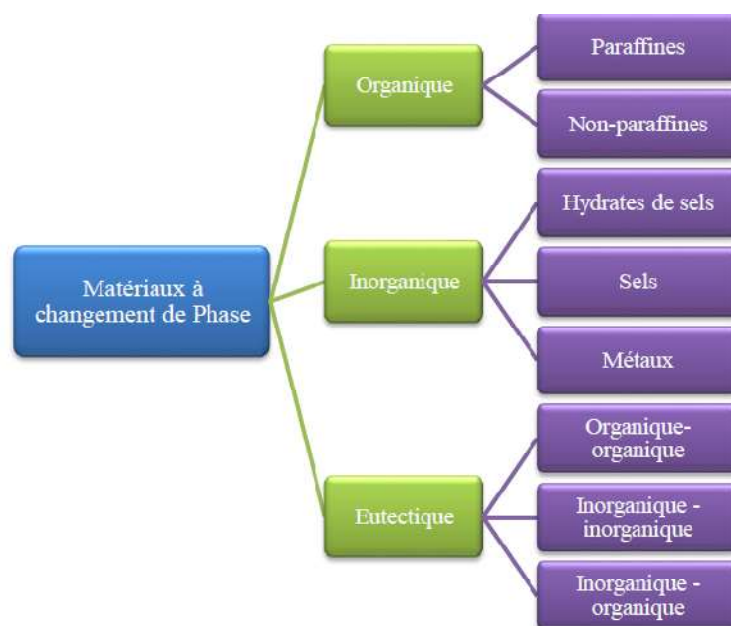


Figure 2.2 : Classification des MCP proposée par Abhat [17]

On trouve dans les composés organiques principalement les paraffines, les alcools de sucre, les acides gras et d'autres composés moins utilisés comme les cétones ou les esters.

2.2.3 Paraffines

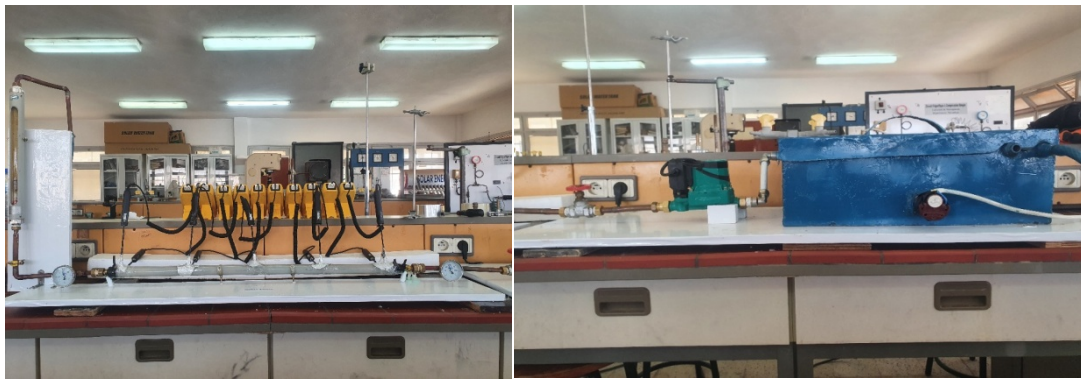
Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application.

Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$) [18].

**Chapitre 3:
Procédure expérimentale**

3. Procédure expérimentale

Ce chapitre porte sur la réalisation d'un banc d'essai expérimentale consacré à l'étude de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) dans une conduite. Les expériences suivantes ont été réalisées au niveau du laboratoire de génie mécanique à la faculté des sciences et de la technique (Université de Mostaganem).



(1)

(2)

Figure 3.1 plant d'essai ; 1) coté gauche, 2) coté droit.

3.1 Matériel et accessoire de l'installation :

- Pompe à eau : assure la circulation de l'eau chaude.
- Capteur de température : mesurer la température au niveau de PCM.
- Débitmètre : contrôler le débit de l'eau circulant au sein de circuit de la tuyauterie.
- Résistance thermique : augmenter la température de l'eau.
- manomètre de température : contrôler la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la section d'essais.

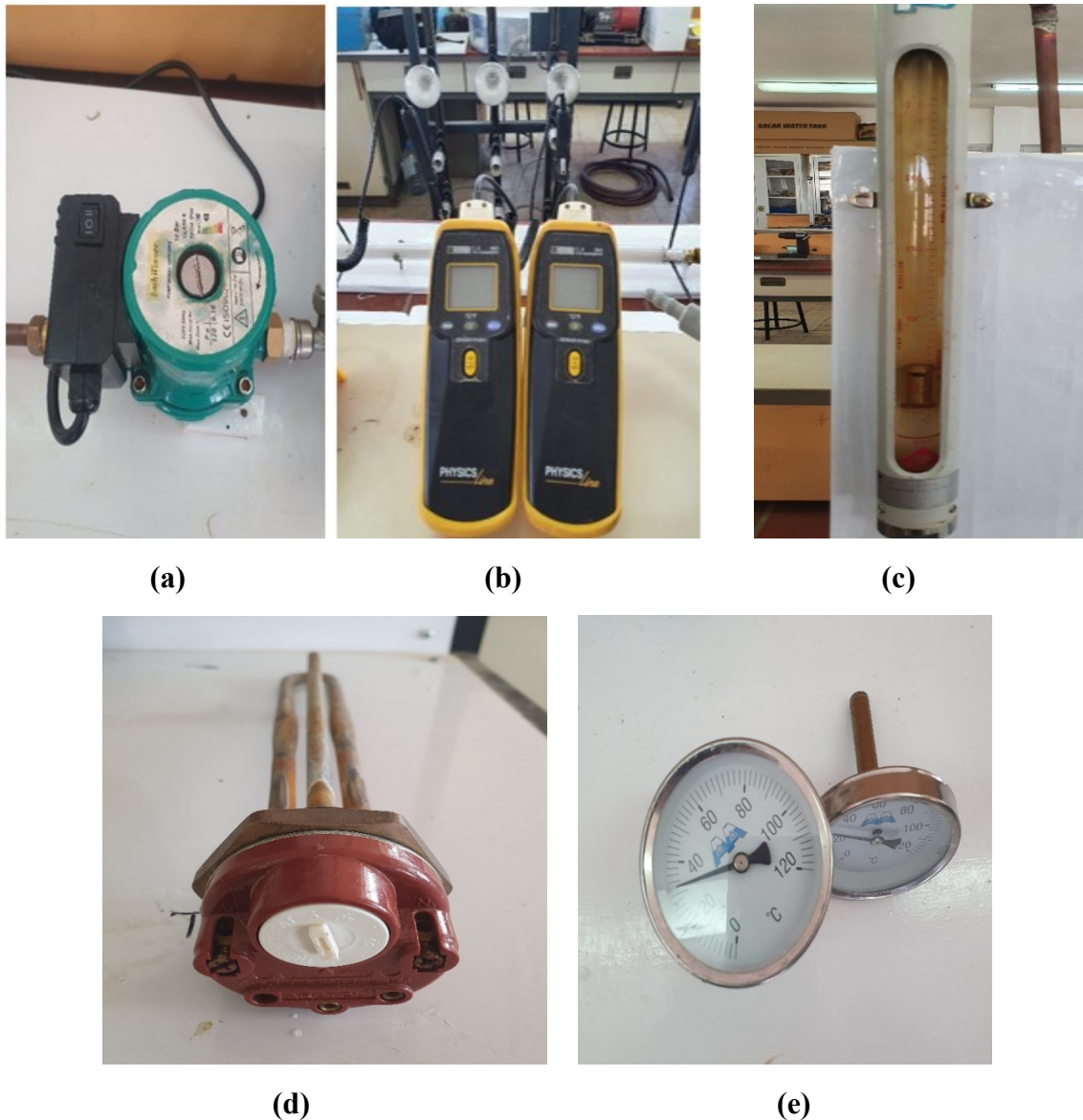


Figure 3.2. Matériel et accessoire de l'installation ; a) pompe à eau, b) capteur de température, c) Débitmètre, d) Résistance Thermique, e) manomètre de température.

3.2 Matériau de tuyauterie :

Le cuivre : élément très utilisé sur ce type d'appareils en raison de ses importantes caractéristiques de conductivité thermique, de sa souplesse d'utilisation et de sa résistance mécanique élevée. Il est important de souligner que l'une des variables ayant le plus d'influence sur les échangeurs de chaleur est le type de fluide nécessaire à la thermorégulation.



Figure 3.3 Soudage des tubes en cuivre.

3.3 Le choix de MCP:

Le travail a pour but d'étudier le comportement thermique d'un matériau à changement phase MCP (paraffine) pendant la fusion. Le MCP est contenu entre deux tubes (tube en cuivre de diamètre extérieurs 16 cm et tube en plastique transparent pour faciliter la visualisation de diamètre intérieur 24 cm).



Figure 3.4 Paraffine utilisé.

3.4 Remplissage de MCP (paraffine) :

Nous avons cassé le MCP et l'avons mis dans un plat qui peut résister à la chaleur et ensuite, il était mis au four pour décongeler à ($T=130^{\circ}\text{C}$).



Figure 3.5 Remplissage de MCP.

3.5 Placement des capteurs :

nous avons perforé le tube en plastique transparent de (80 cm) en 10 trous (5 en 0 degré et l'autre à 90 degrés en parallèle) et puis on insère la tête du capteur jusqu'à (5.5 mm) à égalité avec les autres.



Figure 3.6 Placement des capteurs.

3.6 Premier cas : nous avons fait l'étude d'un tube horizontal.



Figure 3.7 Section d'essai horizontal.

3.7 Deuxième et troisième cas : l'étude d'un tube vertical entré en bas et en haut, pour savoir l'effet de la gravité sur l'échange de chaleur entre l'eau et le PCM.



Figure 3.8 Section d'essai vertical l'entrée en bas.



Figure 3.9 Section d'essai verticale l'entrée en haut.

Chapitre 04

Résultats et discussions

4. Introduction :

Cette étude concerne la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et le développement d'un système de stockage pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle. L'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) permet d'atteindre une densité énergétique élevée et de restituer la chaleur à température constante. Cependant, leur faible conductivité thermique impose d'améliorer les transferts thermiques, notamment par l'utilisation d'échangeurs à surface augmentée.

Le but est de comprendre le comportement de tels échangeurs en régime transitoire au contact de MCP. Une étude expérimentale à basse température, un échangeur de type tube-calandre seront testés avec différentes orientations (horizontale/verticale) et injections (haut/bas), a mis en évidence des phénomènes de transfert thermique importants, comme la convection naturelle à la charge et la contraction volumique à la décharge.

4.1 Méthodologie

Dans cette étude, trois configurations avec un seul d'échangeur de longueur un mètre sont testées. L'échangeur est un échangeur à tube en cuivre présentant une surface d'échange (côté fluide) de 0.044 m², qu'on définira comme échangeur de référence. Un tube transparent en PMMA est placé autour de l'échangeur, dans lequel est contenue la paraffine.

Pour l'échangeur à tube lisse en cuivre, cinq thermocouples sont placés au milieu du MCP (paraffine), à la périphérie extérieure (au contact du tube de PMMA), à différentes distances du tube, notées « 1 », « 2 », « 3 », « 4 » et « 5 » pour 0 degré et « 6 », « 7 », « 8 », « 9 » et « 10 » pour 90 degré, respectivement à 0 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm et 80 cm de l'entrée de l'échangeur. Enfin, deux sondes sont ajoutées respectivement à l'entrée et à la sortie de l'échangeur, mesurant la température du fluide caloporteur, permettant ainsi de calculer la puissance fournie au MCP par le fluide lors de la phase de chauffage, ou inversement pendant le refroidissement. Enfin, la mesure du débit est réalisée par un débitmètre volumique (en l/h).

4.2 Objectifs

L'objectif visé par ce travail, touche les deux points suivants :

1. Technologique :

Les applications industrielles de ce travail sont les suivantes :

- Dimensionner un système de stockage d'énergie thermique par chaleur latente, afin d'améliorer certaines applications industrielles
- Déterminer la meilleure combinaison entre un système de stockage et un Matériau à Changement de Phase (MCP).

2. Impact attendus

Les résultats obtenus vont contribuer à une meilleure compréhension du phénomène de stockage d'énergie thermique (par chaleur latente).

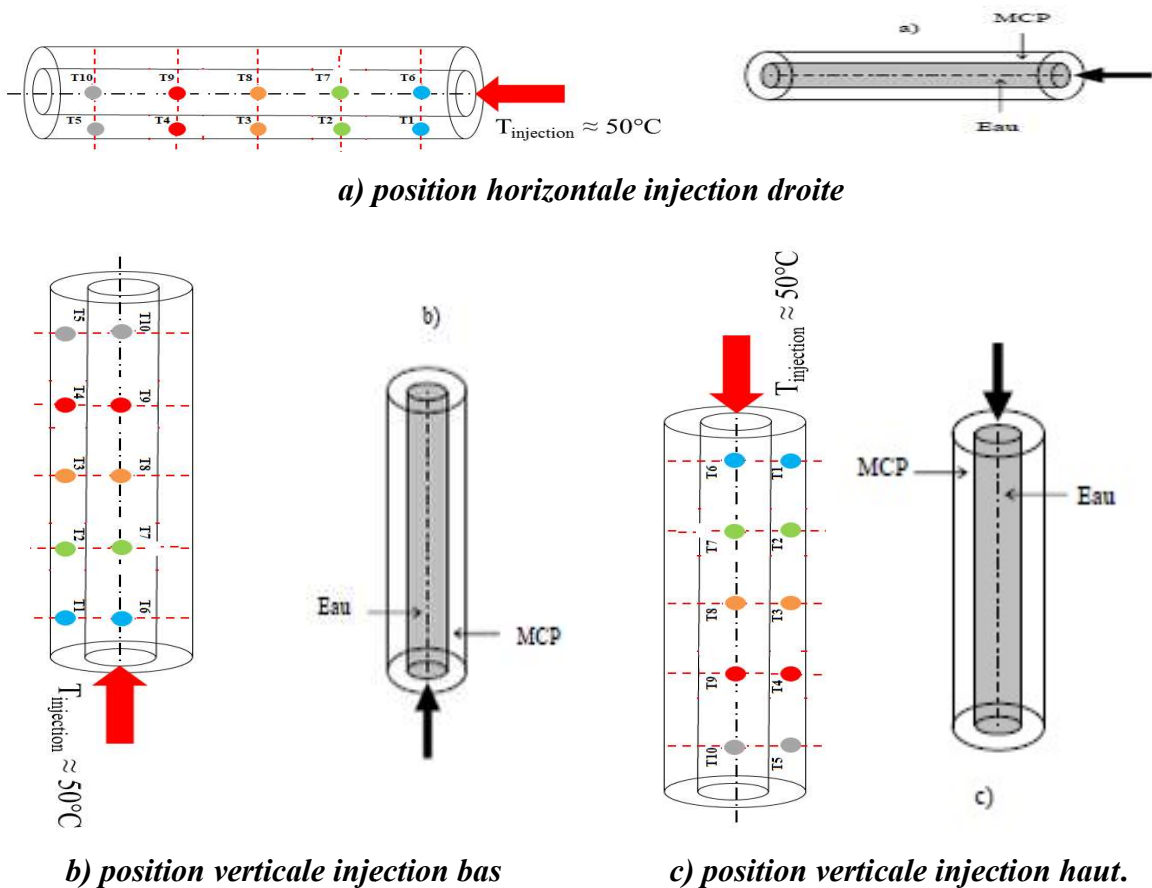


Figure 4.1 : Configurations d'injection possibles durant les essais.

4.3 Les conditions du travail :

Il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses. Les hypothèses utilisées souvent dans l'étude expérimentale d'un échangeur de chaleur utilisant un matériau à changement de phase (MCP) sont comme suit :

- L'écoulement du fluide à l'intérieure du tube interne (Eau) est en régime transitoire $Re = 3270$;
- Le MCP dans le tube extérieur est a l'état statique ($v=0$ m/s) ;
- L'écoulement est incompressible ;
- Le régime d'écoulement est non permanant ;
- Le champ de gravité est non négligé.

4.4 Résultats et discussions

Plusieurs configurations d'injection ont ainsi pu être testées : position horizontale injection droite vers gauche et position verticale injection bas ou haut. Le design horizontal, quant à lui, présente une courbe beaucoup plus éloignée de celle de la température d'injection. De plus, une stabilisation semble se mettre en place entre 60 °C et 65 °C , qui traduirait le changement de phase. Les courbes d'évolution de la température dans le MCP en fonction du temps pour différentes positions axiales sont présentées sur la figure 4.2.

4.4.1. 1^{ère} partie : Configuration horizontale :

Dans le design, le changement de phase se fait assez rapidement pour les thermocouples situés au plus proche de l'injection et dès que le MCP est en phase liquide, sa température subit une légère diminution avant de se stabiliser à la température d'injection. Toutes les courbes présentent cette diminution et ce saut de température mais décalés dans le temps. Ces phénomènes sont attribués à la convection naturelle qui peut se mettre en place entre les tubes lorsque la section d'essais est utilisée à l'horizontale. Pour mieux comprendre ce qu'il se passe dans cette section d'essais, les courbes de température en fonction des positions angulaire et radiale sont présentées pour la coupe axiale sur la figure 4.2 dans l'angle 90 degré.

Dans la charge : L'évolution temporelle de la température dans le MCP pour différentes positions axiales lors d'une charge à l'horizontale est présentée sur les figures 4.2 et 4.5.

Les courbes de température dans le MCP ont une forme similaire à celle rencontrée lors de la charge par le haut, mis à part celles du design. Dans le design, le changement de phase se fait

assez rapidement pour les thermocouples situés au plus proche de l'injection et dès que le MCP est en phase liquide, sa température

subit une légère diminution avant de se stabiliser à la température d'injection. Toutes les courbes présentent cette diminution et ce saut de température mais décalés dans le temps. Ces phénomènes sont attribués à la convection naturelle qui peut se mettre en place entre les tubes lorsque la section d'essais est utilisée à l'horizontale.

Dans la décharge : L'évolution temporelle de la température dans le MCP pour différentes positions axiales lors d'une décharge à l'horizontale est présentée sur les figures 4.4 et 4.7.

L'évolution de la température en fonction de la position axiale confirme ce qui a été vu précédemment sur les images. Le front de solidification n'évolue axialement qu'en début de solidification de design.

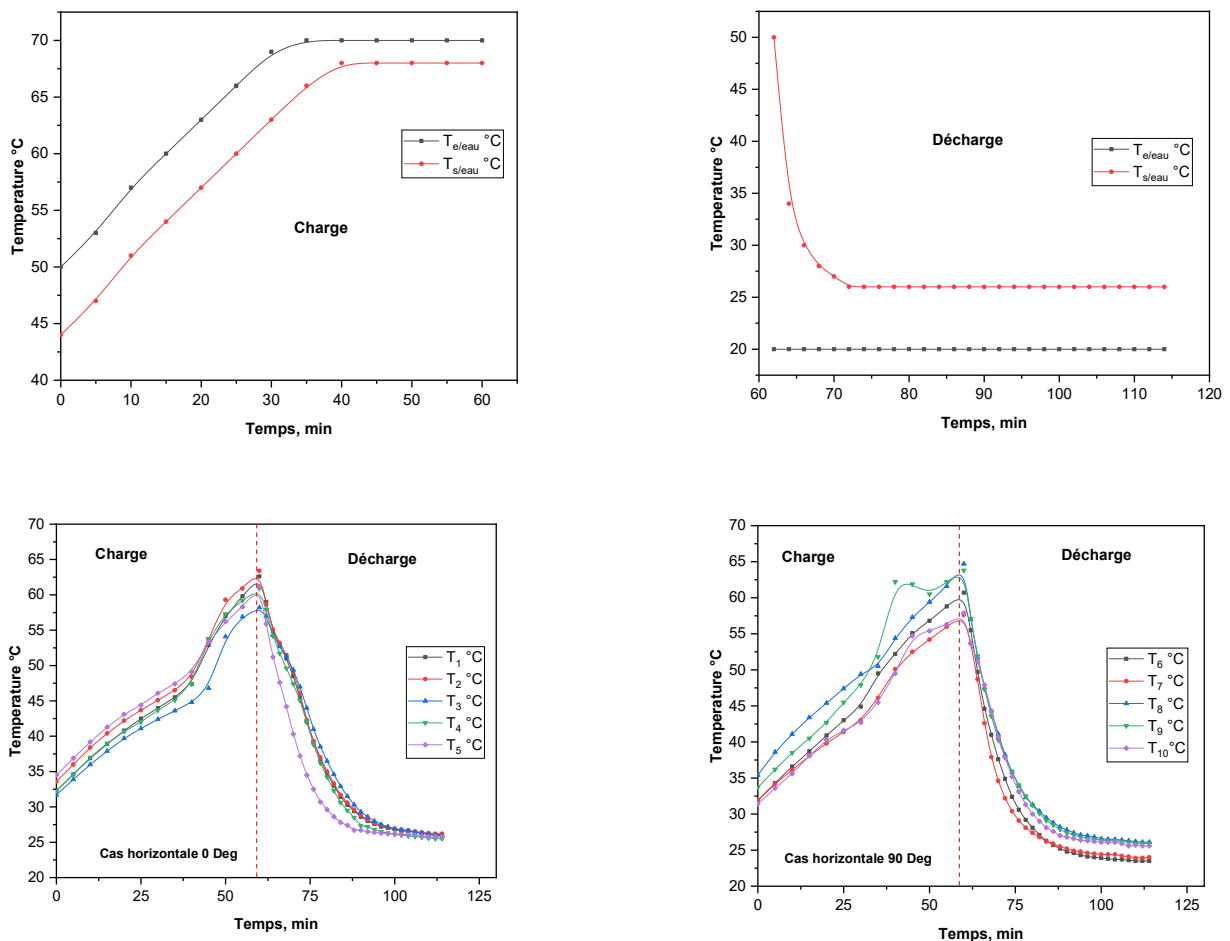


Figure 4.2 : évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur horizontale à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Charge :

Les photos prises lors des charges à l'horizontale de design sont présentées sur les figure 4.3 et 4.6 pour $Q_{v\text{-eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{-eau}} = 70 \text{ °C}$ et la figure 4.6 pour $Q_{v\text{-eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{-eau}} = 80 \text{ °C}$

Dans le design, le front de fusion progresse surtout au milieu de la section d'essais. Le MCP solide est ensuite rogné à la fois en haut et en bas de l'échangeur. Cette forme est due à la proximité des tubes périphériques et de la calandre et aux mouvements liquides qui poussent le MCP dans la moitié supérieure de l'échangeur. L'analyse des profils de température en fonction de la position angulaire permettra de mieux comprendre les phénomènes de transfert de chaleur prépondérants dans ce type de géométrie.

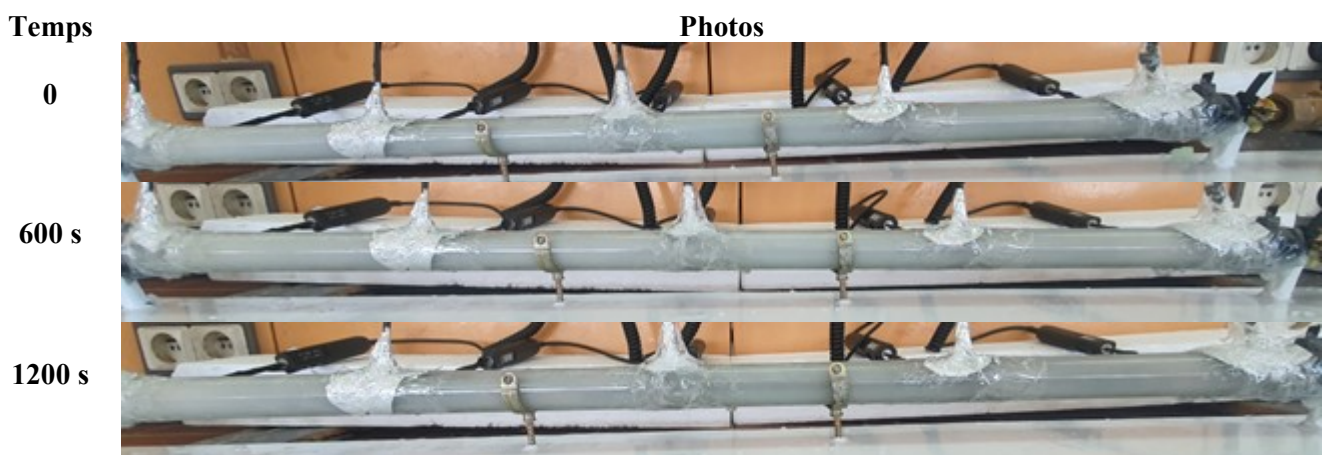
Décharge :

Le premier essai présenté est la décharge horizontale avec injection d'eau froide à 21 °C qui a été réalisés pour le premier design.

Les photos prises lors des essais sont présentées sur les deux figure 4.4 et 4.7. Pour le design, la solidification commence dans la moitié inférieure de l'échangeur et se propage ensuite vers la moitié inférieure. La convection naturelle, possible dans cette configuration d'échangeur permet ainsi d'établir une stratification thermique de haut en bas et retarde la solidification des zones supérieures de l'échangeur.

Concernant les temps de solidification, on relève les valeurs suivantes :

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 70 °C , à 480 s , le front de solidification ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.
- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 80 °C , à 720 s , le front de solidification ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.



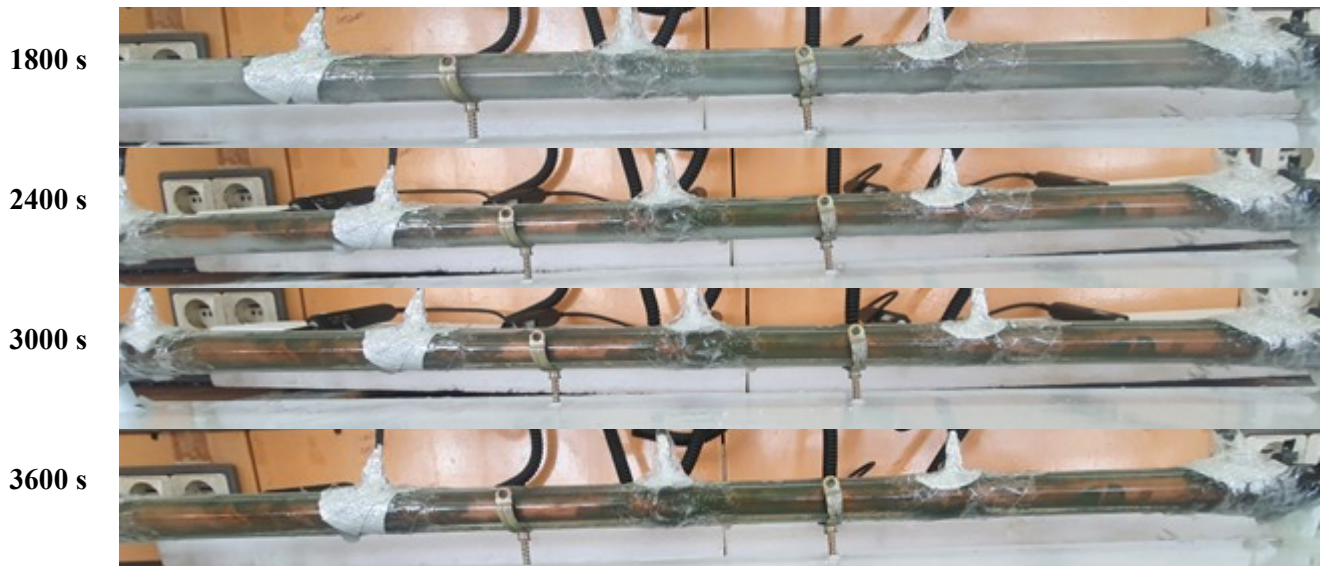


Figure 4.3 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge à l'horizontale à $Q_{v\text{ eau}} = 60$ l/h et $T_{e\text{ eau}} = 70$ °C.

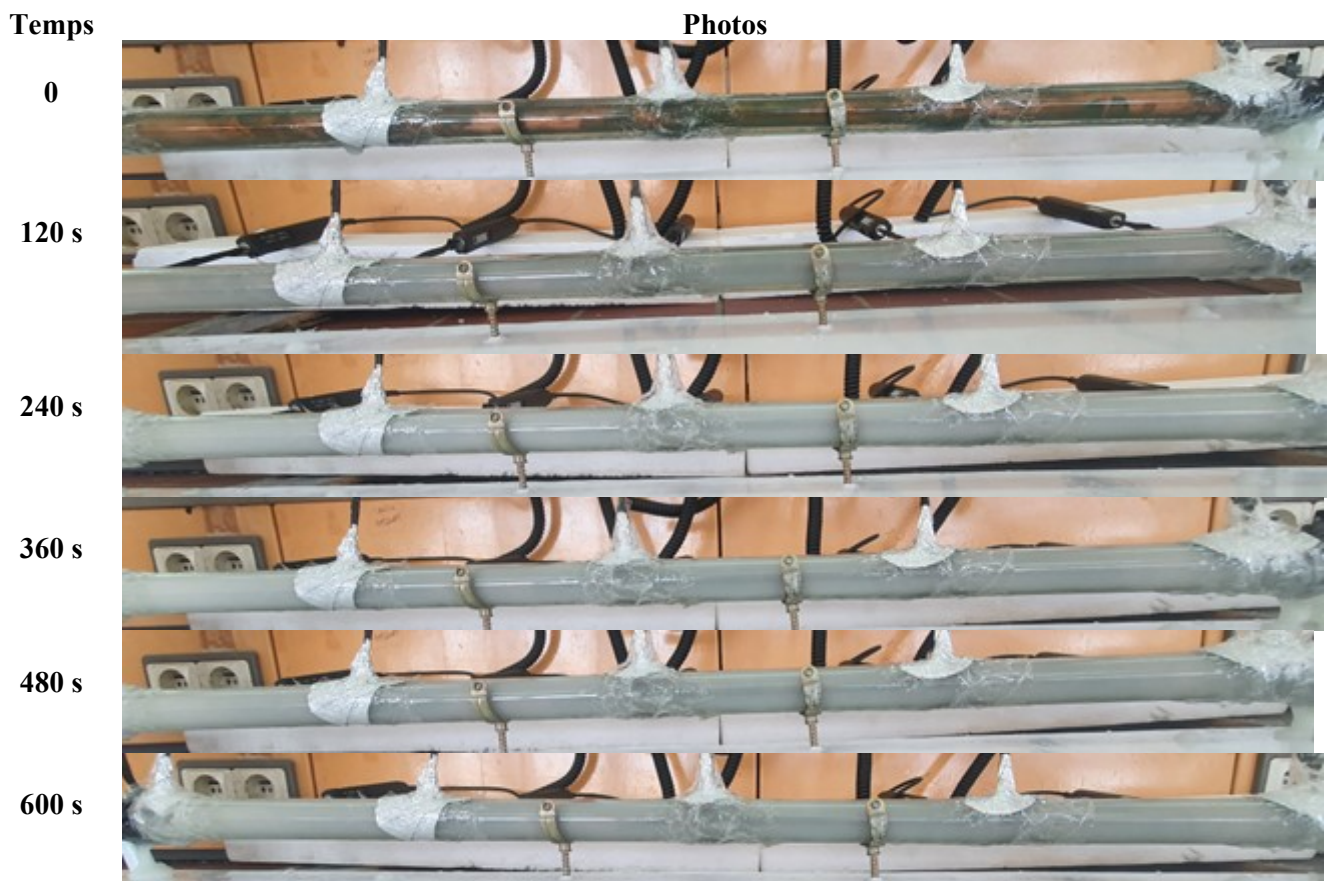


Figure 4.4 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge à l'horizontale à $Q_{v\text{ eau}} = 60$ l/h et $T_{e\text{ eau}} = 70$ °C.

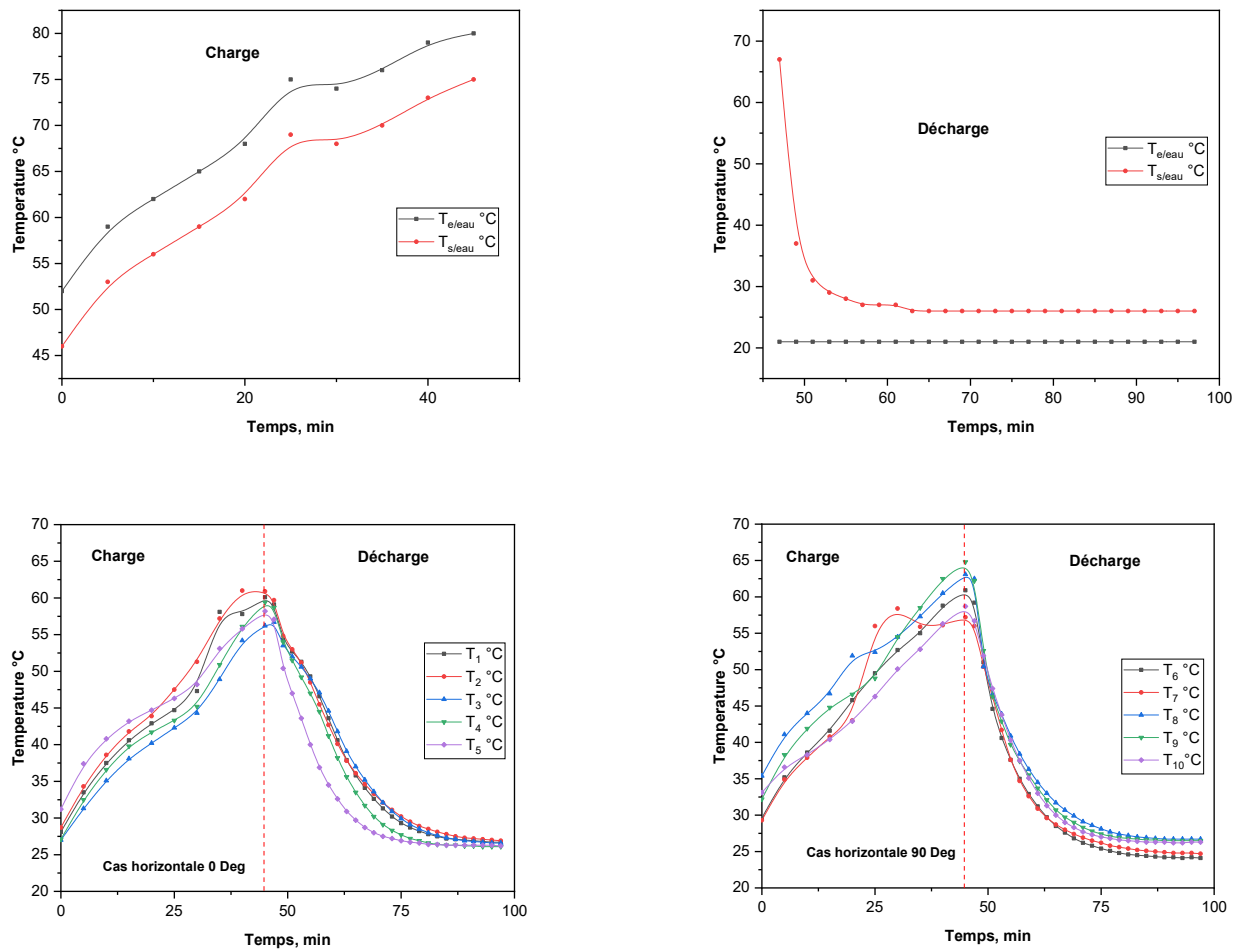
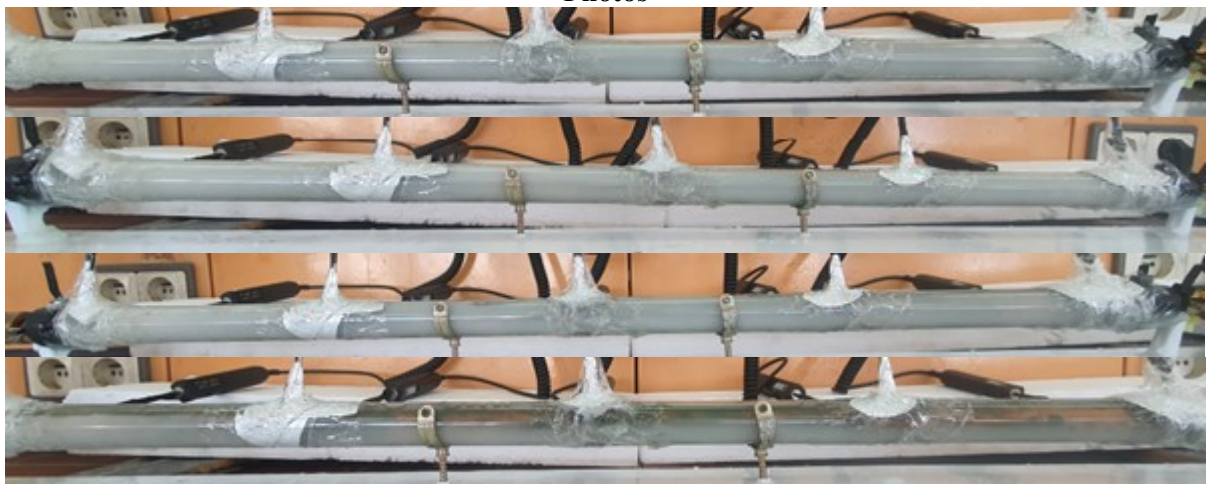


Figure 4.5 : évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur horizontale à $Q_{V\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Temps

Photos

0
600 s
1200 s
1620 s



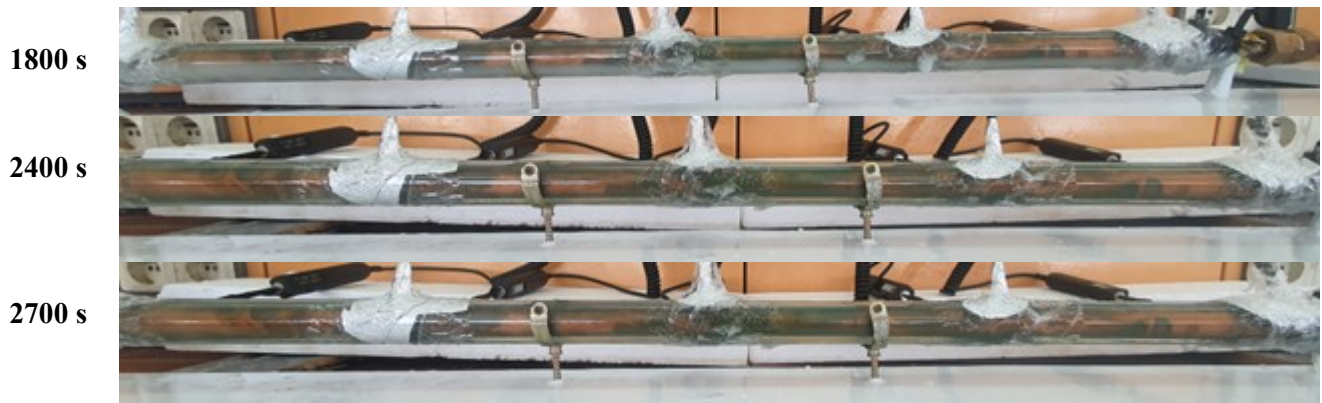


Figure 4.6 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge à l'horizontale à $Q_{v\text{ eau}} = 60$ l/h et $T_{e\text{ eau}} = 80$ °C.



Figure 4.7 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge à l'horizontale à $Q_{v\text{ eau}} = 60$ l/h et $T_{e\text{ eau}} = 80$ °C.

4.4.2. 2^{ème} partie : Configuration verticale en bas

Charge et décharge :

Dans la charge : Les courbes de l'évolution temporelle de la température dans le MCP en fonction de la position axiale sont présentées sur les figures 4.8 et 4.11. Tous les thermocouples ont un profil de température similaire qui peut être comparé à celui de la charge par le haut. Les phénomènes de transfert principaux sont en effet retrouvés :

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 70°C, à 4800 s, le front de fusion ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.
- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 80°C, à 3000 s, le front de fusion ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.

Quelques points de divergence avec la charge par le haut sont cependant à noter. Pour le design à tube lisse, malgré l'injection de la température par le bas de l'échangeur, la répartition de la température en fonction de la position axiale est en ordre inverse par rapport au côté de l'injection. En effet, les thermocouples situés plus loin de l'injection ont une température plus élevée après le changement de phase. Cet effet est expliqué par les mouvements de MCP liquide dus à la gravité mais aussi à l'expansion volumique qui permettent au MCP chaud de remonter dans l'échangeur.

Dans la décharge : L'évolution temporelle de la température dans le MCP en fonction de la position axiale est présentée pour les quatre designs sur les figures 4.8 et 4.11.

Les courbes de température en fonction du temps ont une forme identique à celle déjà détaillée lors de la décharge par le haut. Cependant, la répartition de la température en fonction de la position axiale n'est pas du tout la même.

Quelques points de divergence sont à noter. Au début de l'essai, alors que la stratification thermique s'inversait dans le design en début de décharge par le haut, dans ce cas, l'injection de froid par le bas respecte la stratification thermique naturelle.

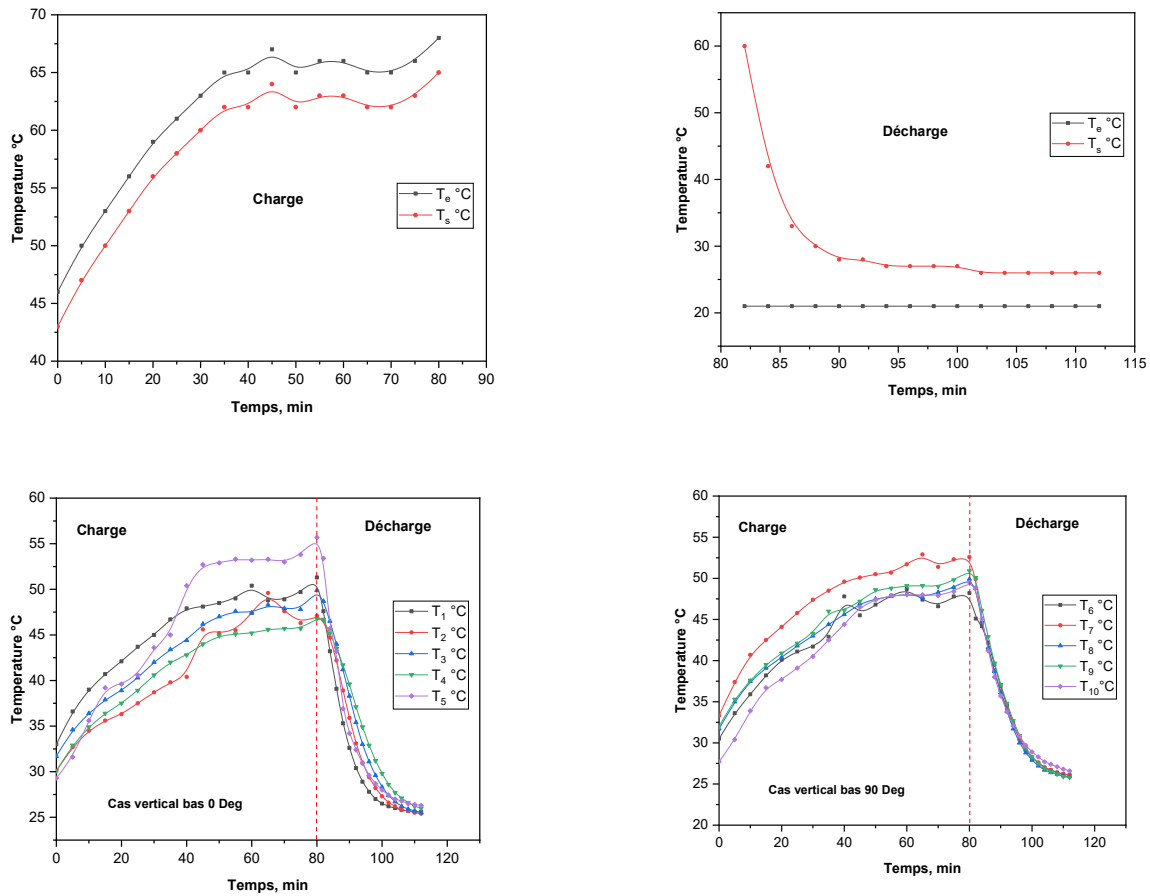


Figure 4.8 : évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en bas à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 70 \text{ °C}$.

Charge :

Les photos des fronts de fusion lors de la charge par le bas sont présentées pour la section d'essai sur les figure 4.9 et 4.12. On constate que comme pour la charge par le haut, les fronts de fusion évoluent de haut en bas dans la section d'essai à tube lisse. Ce sens d'évolution du front de fusion est attribué aux mouvements de MCP liquide qui se mettent en place dans ces types d'échangeurs.

En effet, en début d'essai, une couche de MCP liquide apparaît autour du tube ouvrant ainsi une voie liquide au MCP qui commence à fondre en bas de l'échangeur. La convection naturelle et l'expansion volumique poussent alors le MCP chaud dans un effet cheminé vers les couches supérieures de l'échangeur. Un mouvement de circulation se met ensuite en place entre le MCP solide et la surface d'échange du tube central, rognant ainsi par le haut le reste du MCP solide de la couche superficielle de l'échangeur. Vu de l'extérieur, on a l'impression que le front de fusion évolue uniquement de haut en bas dans l'échangeur, ce qui n'est pas

réellement le cas. Lors de la charge par le haut cette évolution était plus représentative de l'évolution réelle du front de fusion.

Décharge :

Le deuxième essai présenté est les décharges par le bas avec injection d'eau froide à 21 °C qui ont été réalisés pour le deuxième design.

Les photos prises pendant les décharges par le bas pour les quatre sections d'essais sont présentées sur les deux figures 4.10 et 4.13.

Comme lors de la décharge par le haut, un premier front de solidification apparaît d'abord autour du tube, celui-ci progresse essentiellement radialement.

Dans un second temps, on peut distinguer une évolution du front de solidification du bas vers le haut de l'échangeur. Celui-ci est dû à l'injection du froid en bas de la section d'essais et au gradient de température assez important dans l'eau.

Enfin, la surface libre joue également un rôle non négligeable pour toutes les sections d'essais. En effet, en même temps que le front de solidification progresse de bas en haut, la surface libre qui descend à cause de la contraction volumique provoque un troisième front de solidification de haut en bas.

Concernant les temps de solidification, on relève les valeurs suivantes :

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 70°C, à 960 s, le front de solidification ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.
- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 80°C, à 720 s, le front de solidification ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.



Figure 4.9 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le bas à $Q_{v\text{ eau}} = 60$ l/h et $T_{e\text{ eau}} = 70$ °C.

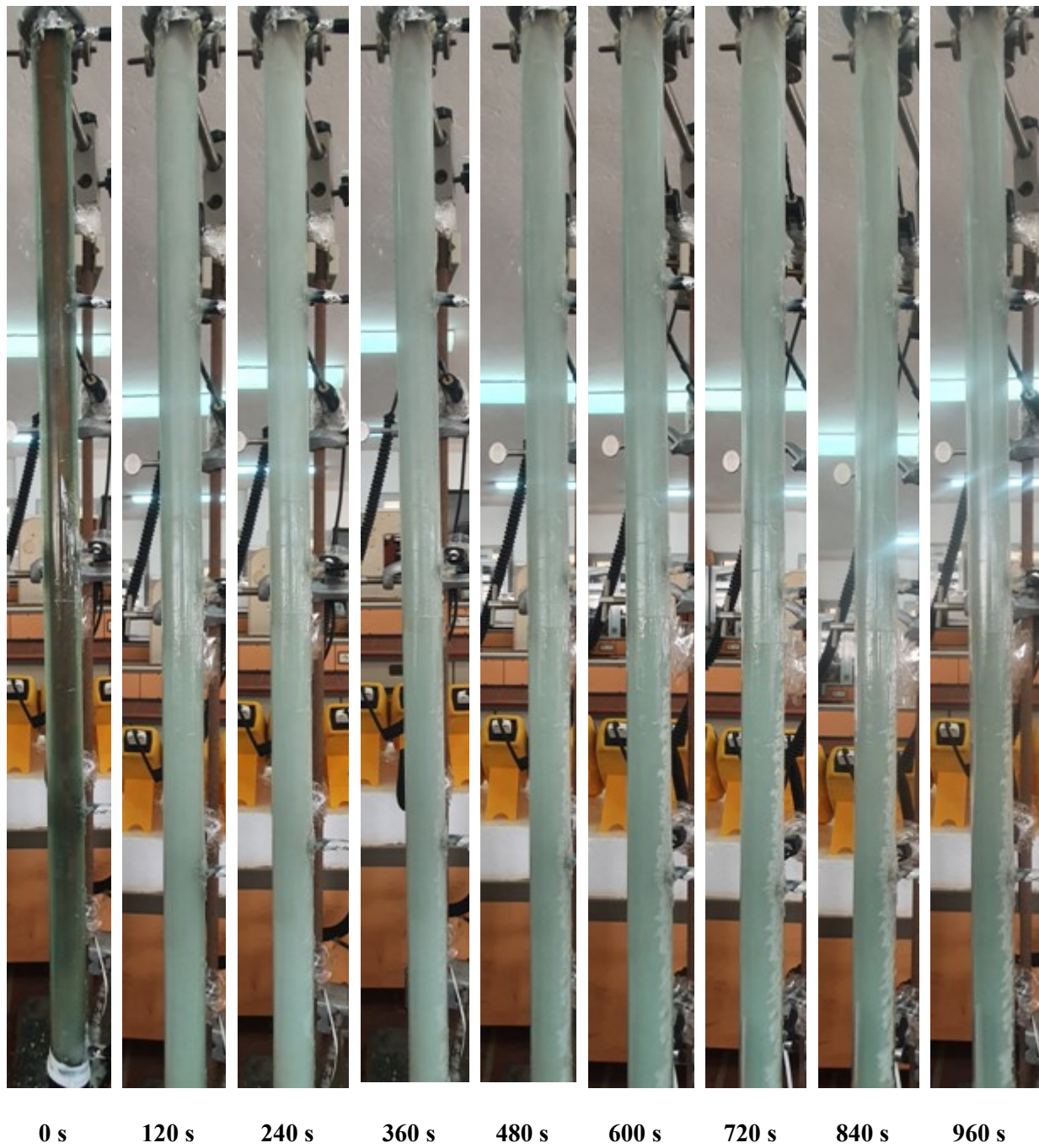


Figure 4.10 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le bas à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

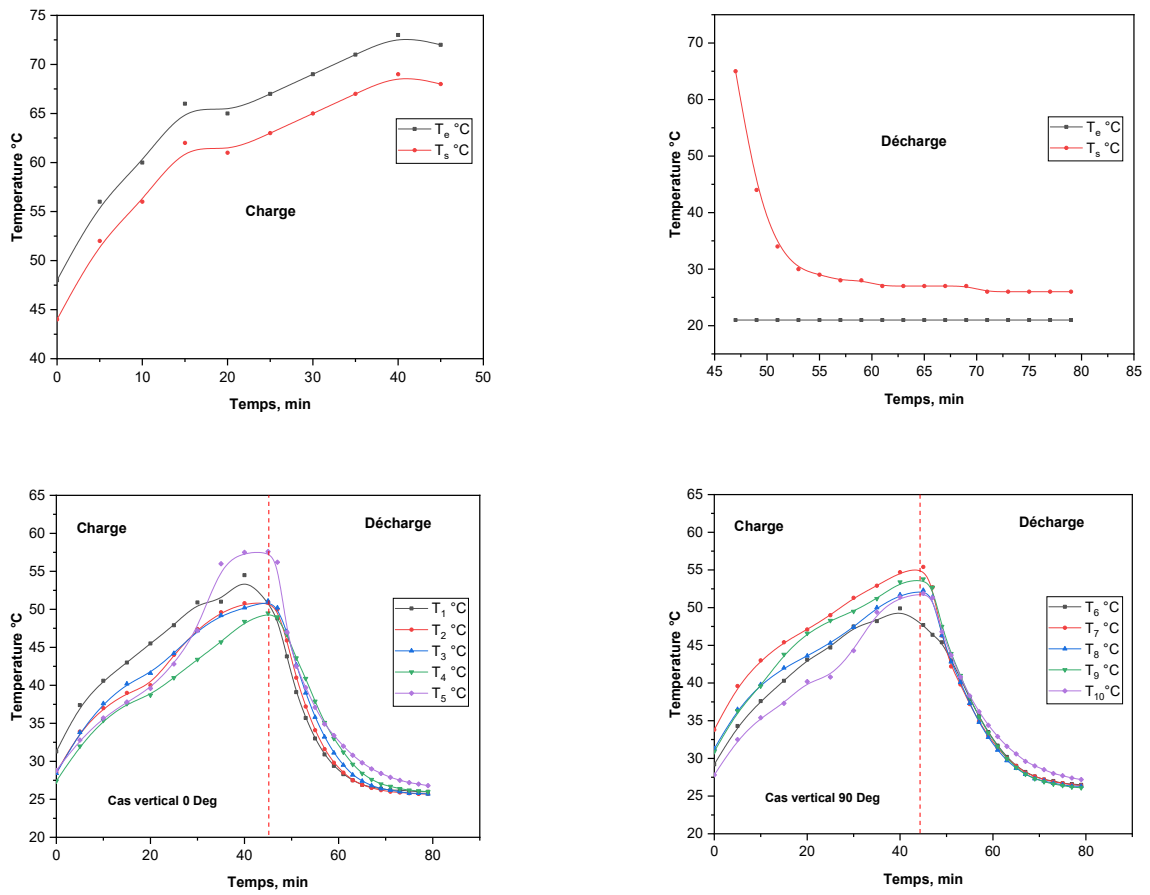


Figure 4.11 : évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en bas à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 80 \text{ °C}$.



0 s

600 s

1200 s

1800 s

2400 s

3000 s

Figure 4.12 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le bas à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figure 4.13 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le bas à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 80 \text{ °C}$.

4.4.3. Troisième partie : Configuration verticale en haut

Charge et décharge:

Dans la charge : Pour mieux comprendre les mécanismes qui entrent en jeu dans chacun des échangeurs, l'évolution temporelle de la température en fonction de la position axiale est présentée sur les deux figures 4.14 et 4.17. Tous les profils de température suivent à peu près la même évolution mais de manière décalée dans le temps. Plus le thermocouple est près de l'injection, plus vite il sera concerné par les phénomènes de transfert. En tout début d'essai, la température augmente assez rapidement en suivant la forme approximative d'une racine carrée. Cette augmentation correspond au transfert essentiellement conductif entre le fluide caloporteur, la paroi de l'échangeur et le MCP solide. A ce stade de la charge, il y a en effet peu de MCP liquide dans le système et ainsi très peu de convection.

Dans la charge : Les courbes de la température du fluide caloporteur en entrée et en sortie de la section d'essais sont présentées pour les quatre designs sur les deux figures 4.14 et 4.17 dans la partie 2. La température d'injection du fluide caloporteur pour les décharges est d'environ 21°C. Cependant, comme pour les essais de charge, celle-ci n'est pas tout de suite constante en début de décharge à cause de l'inertie thermique de la section d'essais. Avant de démarrer l'essai, la température de la section d'essais est en effet maintenue à sa température de fin de charge grâce au circuit de stabilisation, tandis que le circuit de mesure tourne à la température froide. On remarque que la température d'injection n'est pas tout à fait égale à 21 °C durant les essais. Ceci est dû à la difficulté à prévoir la réactivité de la section d'essais et du circuit en fonction des conditions extérieures du jour. Par ailleurs, comme lors des charges, la forme de la courbe de la température de sortie dépend du design.

Pour le design, la température peine à monter à la température de changement du MCP. Elle atteint tout juste 30 °C en début d'essai puis se stabilise directement à la température d'injection qui est d'environ 24 °C. Ce qui laisse penser que ce design ou cette configuration d'injection est vraiment inefficace pour passer la puissance côté fluide caloporteur.

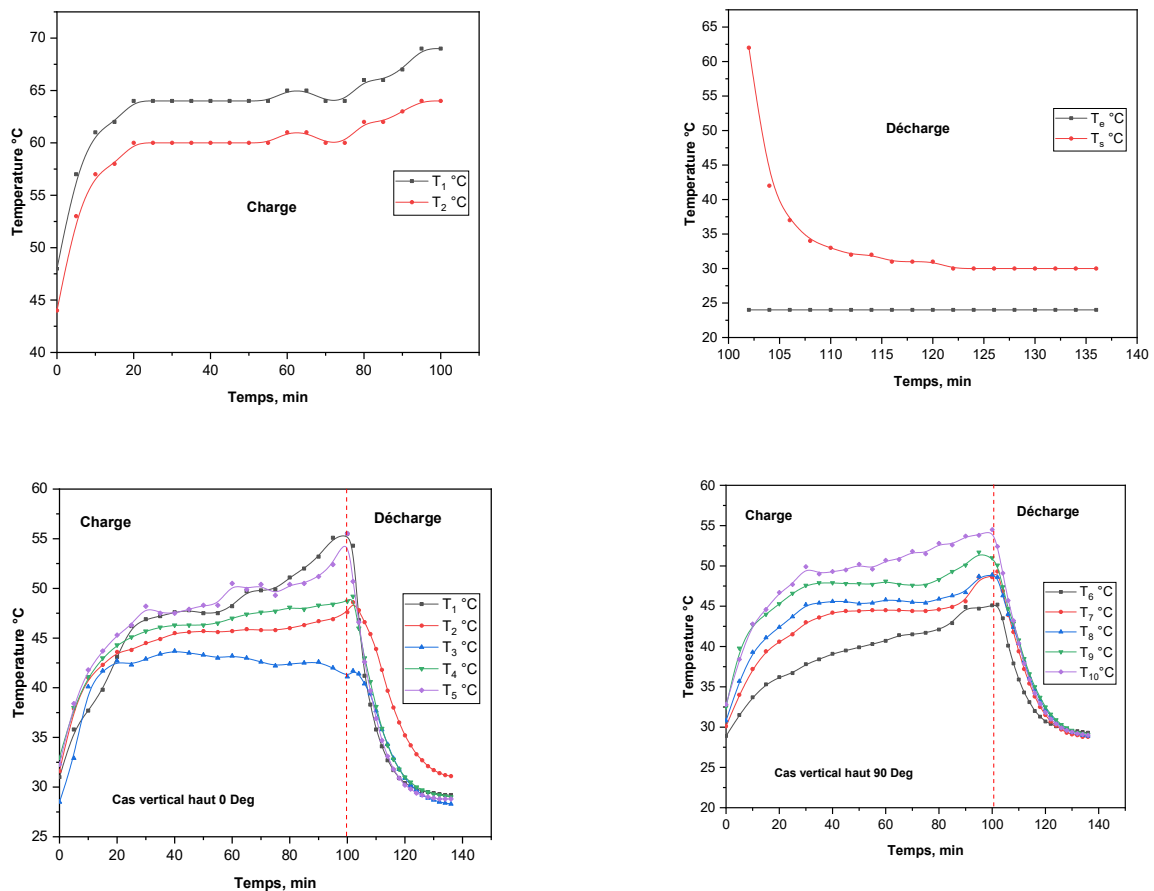


Figure 4.14 : évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en haut à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Charge :

Les photos de la charge par le haut sont présentées pour différents temps sur les deux figure 4.15 et 4.18. Pour la section d'essai, l'évolution des fronts de fusion se fait de haut en bas. La forme de chaque front dépend cependant de la géométrie étudiée. Pour le design, le front de fusion est relativement horizontal. Etant donné que les fronts de fusion sont observés depuis l'extérieur, cette forme est représentative de ce qui se passe en périphérie de la section d'essais et non de la forme du front de fusion à l'intérieur. De plus, des mouvements de circulation qui se mettent en place dans l'échangeur entre la phase liquide et la phase solide rognent progressivement le MCP solide. Concernant les temps de fusion, on relève les valeurs suivantes :

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 70°C , à 6000 s, le front de fusion ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 80°C, à 2700 s, le front de fusion ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.

Décharge :

Le troisième essai présenté est les décharges par le haut avec injection d'eau froide à 21 °C qui ont été réalisés pour le troisième design.

Dans un premier temps, des photos prises à différents moments des décharges par le haut sont montrées sur les deux figures 4.16 et 4.19.

Lors des décharges par le haut, deux phénomènes majeurs peuvent être recensés.

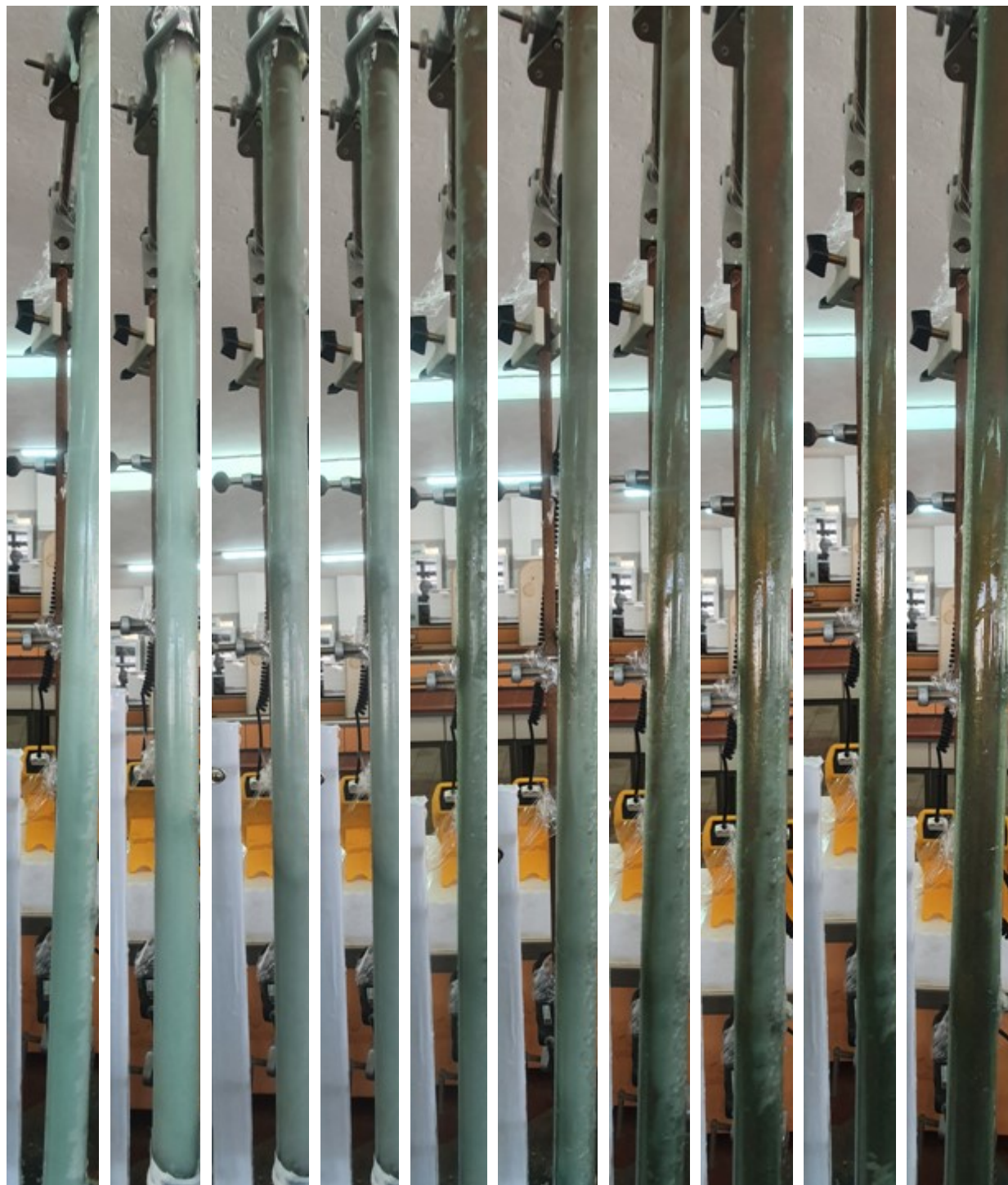
Dans un premier temps, le front de solidification progresse de manière radiale sur toute la hauteur de tube, formant ainsi une couche solide autour des zones les plus performantes de l'échangeur.

Dans un second temps, le niveau de liquide baisse au fur et à mesure que le MCP solidifie. Cet effet est dû au rétreint volumique pour la paraffine. La surface libre du liquide est mobile et c'est à partir de cette surface que commence le deuxième front de solidification qui progresse vers le bas de l'échangeur.

Concernant les temps de solidification, on relève les valeurs suivantes :

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 70°C, à 720 s, le front de solidification ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.

- Pour le design à la température d'entrée de l'eau égale à 80°C, à 600 s, le front de solidification ne se situe qu'à la moitié de l'échangeur.



0 s 1200 s 1800 s 2400 s 3000 s 3600 s 4200 s 4800 s 5400 s 6000 s

Figure 4.15 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le haut à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.



0 s

120 s

240 s

360 s

480 s

600 s

720 s

Figure 4.16 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le haut à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 70 \text{ °C}$.

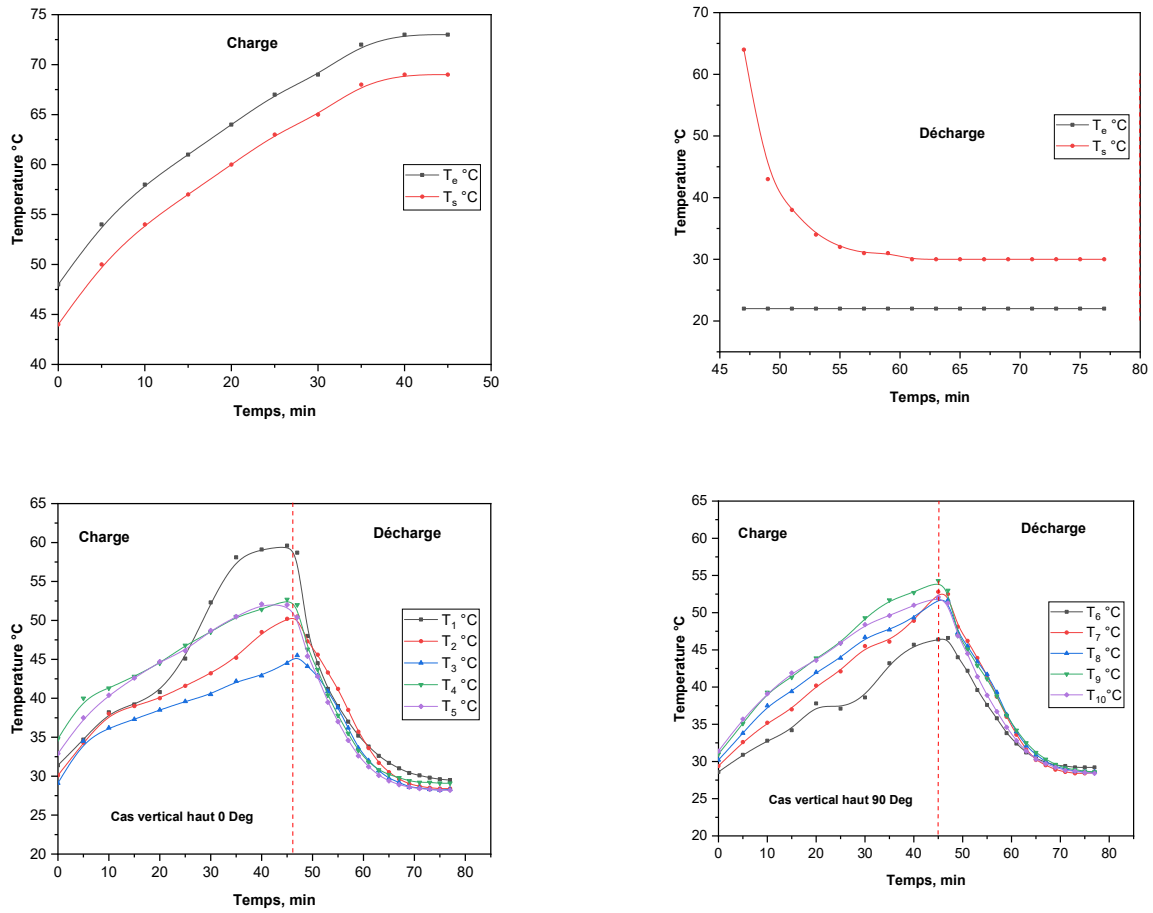


Figure 4.17 : évaluation des températures en fonction du temps pendant la charge et décharge dans la configuration de l'échangeur verticale en haut à $Q_{v\text{ eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{e\text{ eau}} = 80 \text{ °C}$.



Figure 4.18 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une charge par le haut à $Q_{\text{v eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{\text{e eau}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figure 4.19 : Evolution temporelle des fronts de solidification lors d'une décharge par le haut à Q_v
 $_{\text{eau}} = 60 \text{ l/h}$ et $T_{\text{eau}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans notre étude nous ont pris deux cas différents d'échangeurs de chaleur, dans le premier cas nous avons fait l'étude d'un tube concentrique à double diamètre horizontal, et dans le deuxième cas le tube en vertical (entré en bas et en haut), Nous faisons le chauffage et le refroidissement de l'eau dans les échangeurs de chaleur. Pour le chauffage en a utilisé l'eau chaude à circuit fermé et pour le refroidissement l'eau froide a circuit ouvert, et en variant la température de l'eau et le débit.

En conclu que :

- Dans la charge horizontale : L'analyse des profils de température en fonction de la position angulaire permettra de mieux comprendre les phénomènes de transfert de chaleur prépondérant dans ce type de géométrie.
- Dans la décharge horizontale : L'évolution de la température en fonction de la position axiale confirme ce qui a été vu précédemment sur les images. Le front de solidification n'évolue axialement qu'en début de solidification de design.
- Dans la charge verticale en bas: la convection naturelle et l'expansion volumique poussent alors le MCP chaud dans un effet cheminé vers les couches supérieures de l'échangeur. Un mouvement de circulation se met ensuite en place entre le MCP solide et la surface d'échange du tube central, rognant ainsi par le haut le reste du MCP solide de la couche superficielle de l'échangeur.
- Dans la décharge verticale en bas: la surface libre joue également un rôle non négligeable pour toutes les sections d'essais. En effet, en même temps que le front de solidification progresse de bas en haut, la surface libre qui descend à cause de la contraction volumique provoque un troisième front de solidification de haut en bas.
- Dans la charge verticale en haut: Étant donné que les fronts de fusion sont observés depuis l'extérieur, cette forme est représentative de ce qui se passe en périphérie de la section d'essais et non de la forme du front de fusion à l'intérieur. De plus, des mouvements de circulation qui se mettent en place dans l'échangeur entre la phase liquide et la phase solide rognent progressivement le MCP solide.
- Dans la décharge verticale en haut: dans un second temps, le niveau de ne liquide baisse au fur et à mesure que le MCP solidifie. Cet effet est dû au rétreint volumique pour la paraffine. La surface libre du liquide est mobile et c'est à partir de cette surface que commence le deuxième front de solidification qui progresse vers le bas de l'échangeur.

Reference bibliographies

Reference bibliographies:

- [1] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management* 45, 1597–1615, 2004.
- [2] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 615–628, 2010.
- [3] T. Watanabe, H. Kikuchi, et A. Kanzawa, "Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperatures", *Heat Recovery Systems and CHP*, vol. 13, no. 1, pp. 57-66, 1993.
- [4] A. Karaipekli, A. Sari, et K. Kaygusuz, "Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications", *Renewable Energy*, vol. 32, no. 13, pp. 2201-2210, Oct.2007.
- [5] G. Peiro, J. Gasia, L. Miro, et L. F. Cabeza, "Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage", *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 729-736, Nov.2015.
- [6] S. Pincemin, X. Py, R. Olivès, Evolution de la conductivité thermique de composites PCM/graphite en fonction de la température, Congrès Français de thermique, 3-6 juin 2006, Toulouse
- [7] H. Mehling, S. Hiebler, F. Ziegler, Latent heat storage using a PCM-graphite composite material, TERRASTOCK, 2000
- [8] M. Medrano, M.O. Yilmaz, M. Nogués, I. Martorell, J. Roca, L.F. Cabeza, Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems, *Applied Energy* 86, 2047-2055, 2009
- [9] M. Hadjieva, S. Kanev, et J. Argirov, "Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 27, no. 2, pp. 181-187, July1992
- [10] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009.

Reference bibliographies

- [11] C. Alkan, "Enthalpy of melting and solidification of sulfonated paraffins as phase change materials for thermal energy storage", *Thermochimica Acta*, vol. 451, no. 1-2, pp. 126-130, Dec.2006.
- [12] H. Michels et R. Pitz-Paal, "Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants", *Sol. Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 829-837, 2007.
- [13] H.Mehling et L.F.Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.
- [14] E. Oro, A. Gil, A. de Gracia, D. Boer, et L. F. Cabeza, "Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants", *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 166-173, 2012.
- [15] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zalba, et L. F. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 31-55, 2010.
- [16] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, et L. F. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 2 Case studies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 56-72, 2010.
- [17] A. Abhat, "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials", *Sol. Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 313-332, 1983.
- [18] K. Pielichowska et K. Pielichowski, "Phase change materials for thermal energy storage", *Progress in Materials Science*, vol. 65, no. 0, pp. 67-123, Aug.2014.